生物质炭与土壤可持续管理：从土壤问题到生物质产业

刘晓雨[1,2] 卞荣军[1,2] 陆海飞[1,2] 郑聚锋[1,2] 程 琨[1,2] 李恋卿[1,2] 张旭辉[1,2] 潘根兴[1,2*]

1 南京农业大学 农业资源与生态环境研究所 南京 210095

2 南京农业大学 三聚农业生物质工程中心 南京 210095

摘要 南美洲古老农业文明孕育的暗色肥沃土壤引发了全球生物质炭研究热潮。将农业生产过程中产生的有机废弃物经过低温热裂解技术转化为生物质炭并施用于农田土壤中，是一种新的土壤可持续管理途径，且服务于生物质废弃物治理与生态农业。我国生物质炭工业化生产技术及炭基肥制备与施用技术已经形成，土壤增碳与农业增产、减肥、增效潜力显著。大规模生物质炭工业化生产的推广催生了一个新兴的科技领域——生物质科技与工程。该科技服务于中国巨大的生物质废弃物治理和土壤改良、化肥减量及绿色农业等需求，这一学科领域尚待系统整合和提升。文章提出，研究生物质炭的有机质组分、结构、性质与功能的表征与有机质-矿物-微生物相互作用的基础研究是未来土壤可持续管理中的重要研究方向。这些问题将揭示生物质炭对于农业生命的系统健康及绿色农业的巨大价值，也进一步彰显了土壤学服务于中国农业可持续管理与生物质产业融合的巨大价值。

关键词 生物质热解，生物质炭，炭基肥，土壤改良

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.2018.02.008

1 生物质炭与土壤管理的缘起：自然与传统

20 世纪末期，欧美科学家在巴西等地研究人类古老农业文明时发现，在亚马逊腹地的一些高地存在着一种暗色、富含有机质的肥沃土壤，当地人称这种土壤为“Terra Preta”。最初，科学家认为这种土壤属于暗色黏性土（彼时的“暗色黏性土”即后来的“变性土”，是国际土壤学的热点）。但进一步研究发现，该土壤具有深厚的、富含稳定有机质的暗色层，其 pH 值、阳离子交换量（CEC）以及钙（Ca）和镁（Mg）含量又区别于老成土。这种肥沃土壤引起了国际土壤学界的极大兴趣。Terra Preta 的形成与当地土著居民长期以来的一种“火耕”（Slash and Burn）习惯有关，即每开垦一处新地后

*通讯作者

资助项目：联合国环境署全球环境基金项目（B4SS, GEF 2015），国家自然科学基金项目（41771332）
修改稿收到日期：2018年1月31日

就会将砍伐的林木就地挖坑、掩埋闷烧，并将烧制的炭施入土壤中。长期烧炭入土的耕作方式形成了厚厚的炭化土壤层，该炭化土壤层的存在是其维持高生产力的根本原因。这种土壤的主要特征是富含丰富的有机质，且有机质与土壤矿物结合形成稳定团聚体并长期保存在土壤中，从根本上改善了强酸性贫瘠老成土的肥力水平。这是最早的生物质炭改善土壤、增进肥力的土壤学研究。随后美国康奈尔大学 Johannes Lehmann 博士分别于 2007 和 2016 年撰文，呼吁人类利用炭化技术来改善土壤，以增加土壤有机质、减缓气候变化和提高农业生产力[1,2]。该技术的核心内容是将陆地生态中的有机物质转化成生物质炭（biochar）后再归还到土壤中。2008 年以后，许多研究陆续证实生物质炭可显著改善土壤肥力水平，且生物质炭化生成的有机质在土壤中的更新周期长达数百至千年，低于农业土壤有机质数倍[3]。因此，与减缓全球气候变化相呼应，利用生物质炭增加土壤有机质碳库作为减缓气候变化的农业途径引起了科学界广泛关注，全球生物质炭固碳增汇的潜力不断刷新[4]。

2 废弃物炭化与生物质炭生产：生物质科技与工程的萌生

继在南美洲亚马逊河流域发现 Terra Preta 之后，科学家在欧洲、澳大利亚等地区也发现了类似 Terra Preta 的暗色肥沃土壤。科学家们深信，人类能够通过向土壤中添加炭化的有机质来维持和提升土壤肥力。在南美洲和亚洲一些国家的山区，至今还保留着原始的土坑制炭还田的传统。在一些发达国家，农业生产方式发生很大转变，传统的劳动密集型土坑制炭的方法并不能满足现代农业的需求，而快速的、工业化的生物质炭制备工艺成为满足大规模生物质炭还田的技术需求。最初，许多国家参考木炭的制备工艺，利用低温热裂解工艺生产生物质炭，炭化的原料和方式随即成为炭化技术和工程发展的重要方面。生产生物质炭的原料从最初的林木废弃物扩展到农作物秸秆，又到农业加工过程中产生的稻壳、椰壳，再到城市污水处理过程中产生的污泥，最后到生活垃圾和餐厨废弃物。炭化工艺从最初的土坑、土窑到连续式工业窑，从立式炭化炉到卧式回转窑，从炭化机单体到全程控制的炭化系统。炭化技术的发展，一方面从有机质来源角度处理了生物质源废弃物，属于环境工程领域；另一方面，生产制备的生物质炭用于农业土壤施用，可以改善土壤、增加土壤固碳，服务于减缓气候变化。因为来源都是生物质废弃物，工艺核心都是限氧热裂解，产物核心是黑色固体炭质有机物（图 1），这样的物质被概称为生物质炭。目前，生物质炭化技术已经形成一个介于环境工程、环境管理、土壤管理、气候变化应对的跨学科领域的生物质炭科技与工程。

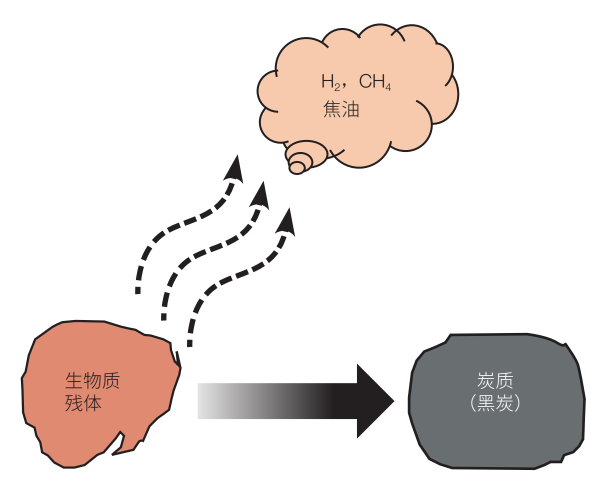


图 1　自然界生物质热裂解基本反应原理

生物质炭科技源于欧美，在西方国家得到了广泛的关注和普及。澳大利亚新南威尔士州的 Stephen Joseph 博士，最早系统地总结生物质炭的制备工艺与技术，并率先在美国注册了生物质炭公司，在一些场合他被称为“世界生物质炭科技之父”。鉴于其在全球推广生物质炭工程方面作出的贡献，Stephen Joseph 博士获得 2017 年澳大利亚国家荣誉勋章（The Order of Australia）。2009 年，Stephen Joseph 与 Johannes Lehmann 合著的《生物质炭科技与环境管理》（*Biochar Science and Technology for Environment Management*）一书出版[5]。这

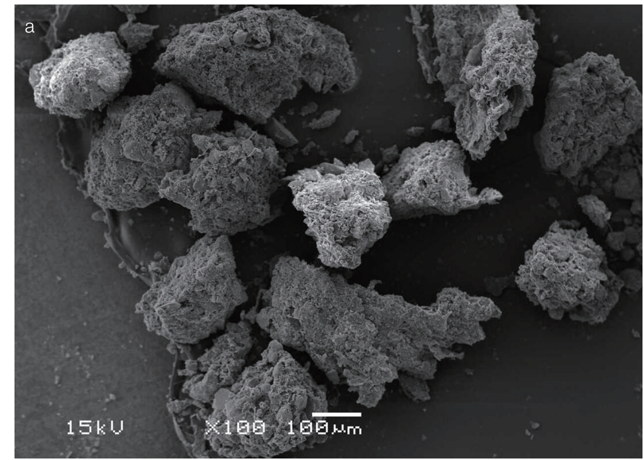
本书被人称为“生物质炭圣经”，并于2015年再版。

生物炭农业应用研究的兴起和一些生物质炭机构的涌现再一次推动了生物质炭科技的发展。2008年，由Stephen Joseph与Johannes Lehmann等人发起，并在美国注册成立了国际生物质炭协会（International Biochar Initiative，IBI）。成立伊始，国际生物质炭协会就通过联合国防治沙漠化公约组织（UNCCD）和联合国控制气候变化框架公约组织（UNFCCC）向联合国提交了生物质炭固沙和固碳减排的全球行动动议。国际生物质炭协会成立后，美国本国的生物质炭科技交流网络（USBI）也相继注册成立（其理事长还是IBI董事局现任主席）。在美国，有些州也成立了自己的生物质炭协会，而宾夕法尼亚州和科罗拉多州还相继注册成立了生物质炭系统工程公司（Biochar Engineering System）和生态生物质炭公司（Eco-engineering）。美国这两家公司围绕林木和污泥废弃物炭化开发出大规模的固定的炭化系统和可移动的炭化系统，在2010年前后居于全球领先。其产品已经广泛应用于园艺生产中。欧盟于2011年启动全欧生物质炭计划，从科学问题、技术分析和应用前景方面开展泛欧国家的交流和合作。英国爱丁堡大学在2010年已经开发出可以连续运行数月的自动控制连续炭化系统中试生产线，但至今没有产业化的工程设备面世。然而，欧盟国家的生物质炭科技主要停留在基础和前期预备性研究中，有些国家（如英国）尚未通过法案允许生物质炭在农业土壤中商业化应用。

3 生物质炭与土壤可持续管理：效应与行动

3.1 生物质炭效应

随着生物质炭化技术和工程的发展，人为控制条件下将废弃物转化生成的生物质炭被广泛用于农业和环境试验研究。研究内容包括，利用生物质改善土壤肥力，提高作物产量，降低温室气体排放，钝化土壤中的重金属，以及吸附水体和土壤中的有机污染物等。十年间积累了大量的观测数据，使得利用整合分析方法评估生物质炭的土壤-生态系统效应成为可能。尽管生物质炭的性质和效应随生物质来源及炭化条件存在差异，但其对许多土壤生物地球化学过程的影响是显著的。这些影响包括改善土壤结构（图2），提高团聚体稳定性，提高土壤水容量[6]，促进微生物生长[7]，并最终提高土壤的生产力（10%）[8]。在提高作物产量的同时，生物质炭还能够快速提高土壤有机碳含量，降低N_2O排放量[9]和污染土壤重金属生物有效性[10]。土壤改良与提质效应，特别是固碳减排仍然是当前的突出需求。废弃物炭化不但处理了秸秆等废弃物，避免了直接焚烧或堆埋分解的排放，增加了土壤有机质碳库，还大幅度改善了土壤的物理性质，促进了生物生长和活性，提升了肥力且降低了环境污染风险，是土壤可持续管理的重要途径。



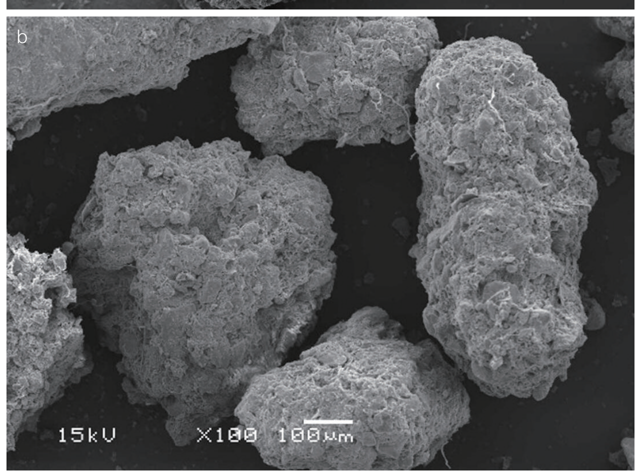


图2 扫描电镜下施用生物质炭后土壤（褐土）团聚体颗粒变化
（a）未施用生物质炭；（b）施用生物质炭（20吨/公顷）

3.2 全球生物质炭与土壤可持续管理全球行动

2015 年，科学家和社会活动家在 *Nature* 撰文呼吁全球农业引入生物质炭土壤改良提升机制，鼓励发展废弃物生物质炭促进土壤固碳和农业生产力提高。近年来科学家们也将生物质炭施加土壤的实践列入减缓气候变化的可行技术途径。联合国全球环境基金（GEF）于 2015 年启动了生物质炭与全球土壤可持续管理（示范）项目，资助在亚洲、非洲和南美洲等地区的 6 个国家开展农民参与的生物质炭土壤改良与肥力提升实践。亚洲开发银行也设立种子项目支持在尼泊尔等亚洲欠发达国家山区的农民进行农业废弃物炭化和生物质炭土壤改良项目，帮助保持和提升土壤肥力，增进农业生产效益。这些项目也带动了非洲一些国家发展生物质炭科技和农业应用的热情，法国 Pro-Natura 等一些国际组织将生物质炭改良土壤和施肥作为脱贫的主要解决方案，还建立了生物质炭试验示范和培训基地，并成立了泛非洲生物质炭研究中心和生物质炭协会以推广其生物质炭科技与应用。生物质炭通过土壤改良与肥力提升而帮助欠发达地区土壤保持和农业增产增效已经被广泛接受，越来越受到国际基金组织的关注。作为扶贫减困助农富农的小计划，一些金融机构也越来越乐于支持这样的环保、自然和农业多赢项目。全球土壤可持续管理的生物质炭应用助推了生物质炭科技及产业的发展。

4 中国生物质炭科技：现状与需求

4.1 废弃物治理与农业的双重压力

随着我国城镇化推进和工业快速发展，农村种植业与养殖业日益分离，农民耕地管理投入日益弱化。农业生产过程中产生的废弃物脱离了生物质的自然循环过程，导致土壤有机质库不断损耗而肥力消减，同时大量生物质废弃物成为农业环境的污染源和温室气体的排放源。我国农业面临耕地土壤酸化、板结、失墒，以及化肥、农药大量使用等问题，农药和抗生素残留流失于环境。秸秆等农业废弃物未得到有效利用，大量直接焚烧加剧了大气污染。在国家绿色发展战略框架下，土壤的可持续管理与废弃物资源化循环成为相辅相成的农业可持续发展的出路[11]。因此，中国比世界上任何一个国家都需要这种既能处置废弃物资源又能培肥土壤的生物质炭科技与工程。

4.2 从废弃物治理走向生物质产业

对生物质炭的深入研究催生了生物质废弃物炭化与生物质炭农业应用的有机结合，初步形成了以热裂解为基础的生物质工程与产业[12]。2017 年 4 月，农业部将秸秆炭化还田列为全国秸秆资源化综合利用的十大模式之一。2017年8月，秸秆工业化生产与炭基肥生态农业技术通过鉴定，被环保企业作为产业技术转化而商业化推广。2017 年 11月底，国家能源局和环保部发布通知，明确支持生物质炭化和炭基肥生产作为煤电生物质能源耦合联产的新模式。秸秆年处理量 1.5 万吨，生物质炭年产 5 000 吨，生物质炭基肥年产 2 万吨的生产系统已经投入运行并快速商业化推广（图 3）。这一套生产系统与多种形式的秸秆收储运系统结合后可以形成秸秆年处理量 1 000 万吨，生产生物质炭 350 万吨，炭基肥 1 200 多万吨的新型生物质炭基产业，其产值将达到 300—400 亿元。这一套集废弃物处理、能源利用与肥料生产为一体的系统形成了一个巨大产业集群，将成为农业源实体经济的新增长点，也提出了科技、工程、管理和金融融合服务的新需求。

4.3 生物质科技与工程学科发展支撑土壤提升及绿色农业

生物质热裂解产业一方面服务于土壤肥力提升和生态农业建设，另一方面为我国生物质炭科技与工程提供了极好的发展机遇。这个学科涉及土壤改良、污染治理、肥料创新和新能源开发等多个生产和经济领域。从产业发展来说，生物质科技与工程将服务于从原料、产品、规模和模式优化热裂解系统及产品创新。同时，设备、产品和模式的系列化、区域化、标准化，需求生物质科技与工程提供全链式产业支持与服务。生物质科技




图3 中国自主研发的年产万吨秸秆生物质炭生产集成系统
（a）连续热裂解炭化转窑系统；（b）热解产物气、液和固三相分离纯化系统

和工程业也展现了土壤改良及可持续管理的广阔发展空间。不同成因低产土壤改良、生产力恢复与提升的普适性生物质炭产品及施用技术，不同农区作物或生产模式的土壤改良-作物施肥双效炭基肥设计与新施肥模式，重金属污染农田治理、盐碱土改良与快速利用、矿山废弃土地的快速恢复与肥力重构等都是针对生物质炭可持续土壤改良与管理的服务需求和技术发展方向。

4.4 生物质炭土壤可持续改良的基础研究工作亟待发展

生物质炭的土壤过程及其生态系统效应的整合研究与机理认识一直是近10年国际土壤学界的研究热点。以往国际上的基础研究偏重于对土壤原有有机碳稳定与否的考量，例如曾经十分纷繁的激发效应与土壤碳更新加快的争议[13]。越来越多的田间试验已经证明了生物质炭促进了土壤有机质的保持和降低非 CO_2 温室气体排放的巨大作用[7,14]。相反，生物质炭在农田增碳、促氮、钝化、增产、优质的多效应偶联特征及其调节，其持效性及其影响因素都认识不足。其关键问题在于对生物质炭-土壤-植物-生物的相互作用的深入剖析。田间试验中经常观察到植物健康与系统的稳定性，而生物质炭如何赋予了土壤-植物系统的抗性（System Acquainted Resistance，SAR，或称“系统稳定性”），其形成机制和不同土壤-植物系统的表现特征，已成为生物质炭土壤可持续管理和生态农业的前沿科学问题。

5 结语

从生物质炭改良土壤提升肥力的农业文明实践出发，以有机废弃物炭化还田为核心的生物质科技与工程性学科领域已经显现光明前景。这一新领域不仅解决农业生物质废弃物处置问题，而且直接服务于快速提升土壤肥力、促进农业固碳减排，以促进土壤可持续管理。随着我国生物质产业的快速推进，工程技术和基础研究的融合发展势在必行。以生物质炭热裂解为核心的生物质科技与工程将成为新的学科领域，同时也需要整合已有的科学技术和资金投入。建议着力加强对生物质炭-土壤-植物-生物相互作用的基础研究，解决生物质炭生态农业的系统健康和可持续性的前沿科学问题。

参考文献

1 Lehmann J. A handful of carbon. Nature, 2007, 447: 143-144.

2 Woolf D, Lehmann J, Lee D R. Optimal bioenergy power generation for climate change mitigation with or without carbon sequestration. Nature Communications, 2016, 7, doi: 10.1038/ncomms13160.

3 Kuzyakov Y, Subbotina I, Chen H, et al. Black carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by ^{14}C labeling. Soil Biology and Biochemistry, 2009,

41: 210-219.

4 邱良祝, 朱修玥, 李恋卿, 等. 生物质科技走向应用, 产业化服务全球农业与环境发展. 国际学术动态, 2017, 5: 14-19.

5 Lehmann J, Joseph S. Biochar for environmental management. In: Science, Tehnology and Implementation. London: Earthscan, 2009.

6 Omondi M O, Xia X, Nahayo A, et al. Quantification of biochar effects on soil hydrological properties using meta-analysis of literature data. Geoderma, 2016, 274: 28-34.

7 Zhou H, Zhang D, Wang P, et al. Changes in microbial biomass and the metabolic quotient with biochar addition to agricultural soils: A Meta-analysis. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2017, 239: 80-89.

8 Liu X, Zhang A, Ji C, et al. Biochar's effect on crop productivity and the dependence on experimental conditions——a meta-analysis of literature data. Plant and Soil, 2013, 373: 583-594.

9 Cayuela M L, van Zwieten L, Singh B P, et al. Biochar's role in mitigating soil nitrous oxide emissions: a review and meta-analysis. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2014, 191: 5-16.

10 Bian R, Joseph S, Cui L, et al. A three-year experiment confirms continuous immobilization of cadmium and lead in contaminated paddy field with biochar amendment. Journal of Hazardous Materials, 2014, 272: 121-128.

11 潘根兴, 李恋卿, 刘晓雨, 等. 热裂解生物质炭产业化: 秸秆禁烧与绿色农业新途径. 科技导报, 2015, 33(13): 92-101.

12 潘根兴, 卞荣军, 程琨. 从废弃物处理到生物质制造业: 基于热裂解的生物质科技与工程. 科技导报, 2017, 35(23): 82-93.

13 Wardle D A, Nilsson M C, Zackrisson O. Fire-derived charcoal causes loss of forest humus. Science, 2008, 320: 629-629.

14 Liu S, Zhang Y, Zong Y, et al. Response of soil carbon dioxide fluxes, soil organic carbon and microbial biomass carbon to biochar amendment: a meta-analysis. Global Change Biology Bioenergy, 2016, 8(2): 392-406.

Biochar for Sustainable Soil Management: Biomass Technology and Industry from Soil Perspectives

LIU Xiaoyu[1,2] BIAN Rongjun[1,2] LU Haifei[1,2] ZHENG Jufeng[1,2] CHENG Kun[1,2] LI Lianqing[1,2] ZHANG Xuhui[1,2] PAN Genxing[1,2*]

(1 Institute of Resource, Ecosystem and Environment of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China;

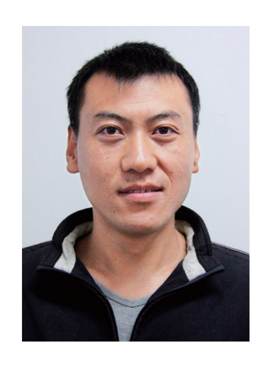
2 Center of Biomass and Green Engineering Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract Understanding of the dark fertile soil named "Terra Preta" from the ancient Amazonian agriculture has led to a global trend of an emerging science of biochar since the early 2000's. It has been well accepted as an approach for soil sustainable management by producing biochar via pyrolysis of agro-wastes and amending it into agricultural soils. It is a new way of organic wastes treatment and soil fertility improvement. With the development of large scaled industrial system of biochar from pyrolysis and biochar-based fertilizers manufacture, it has become an ample opportunity to enhance soil carbon stock, save chemical fertilizer, increase yield, and improve resource use efficiency in China's agriculture. Consequently, an emerging area of biochar science, technology, and engineering based on biomass carbonization, serving for the treatment of huge amount of bio-wastes and soil improvements and chemicals reduction in green agriculture. To promote the development of such a new paradigm, there has been urgent needs to investigate the components, structure, property, and functions of organic

*Corresponding author

matter of biomass and biochar, the char-soil-plant-microbial interactions in croplands. Such issues are very critical for in depth understanding the system resistance enhanced with biochar and the products in agriculture. Meanwhile, there could be a great opportunity for soil science to serve for sustainable management of soils and of bio-waste treatment in agriculture of China.

Keywords biomass pyrolyzing, biochar, biochar based fertilizer, soil improvement



刘晓雨 南京农业大学讲师。2008年毕业于南京农业大学农业资源与环境专业获得学士学位；2013毕业于南京农业大学土壤学专业获得博士学位。主要研究方向为生物质炭农业应用评价。E-mail: xiaoyuliu@njau.edu.cn

LIU Xiaoyu Lecturer of Nanjing Agricultural University. His research interests are the evaluation of biochar soil amendment on soil fertility, crop productivity, and greenhouse gases emission. He received his B.S. and Ph.D. degrees from Nanjing Agricultural University in 2008 and 2013, respectively.

E-mail: xiaoyuliu@njau.edu.cn



潘根兴 南京农业大学教授，土壤学国家重点学科首席教授。长期从事土壤有机质与固碳减排、农业与气候变化、秸秆生物质炭科学技术等方面研究与技术发展。现任南京农业大学农业资源与生态环境研究所所长，南京农业大学生物质炭绿色农业中心主任。曾任国务院学科评议组第四、第五届和第六届农业资源环境一级学科召集人。联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）第五次评估报告温室气体清单-湿地补充文本第二章主持。兼任国家湿地科学技术委员会委员，国家环境地球化学重点实验室学术委员。欧盟生物质炭项目国际专家、联合国环境署生物质炭可持续土壤治理项目中国专家。国际土壤有机质大会科学指导委员会委员，国际固体废弃物管理大会科学委员会委员。E-mail: pangenxing@aliyun.com

PAN Genxing Chief professor in soil science, director of Institute of Resource, Ecosystem and Environment of Agriculture, and the Center of Biomass and Biochar in Agriculture, Nanjing Agricultural University. Prof. Pan's research interests cover soil organic matter and soil carbon sequestration, greenhouse gas mitigation and carbon management in agriculture, biochar science and technology. He also served as the Chair of fourth, fifth, and sixth Subject Evaluation Group of the Academic Degree Committee of the State Council, chief edited the Wetland, supplement to the Fifth Assessment Report on Greenhouse Gas List by Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), adjunct member of National Wetland S&T Committee and Academic Committee of Sate Key Laboratory of Environmental Geochemistry. He has been actively involved in exchange and cooperation activities under IPCC, United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), and UN Environment Programme (UNEP) as well as China's national panels on climate change. E-mail: pangenxing@aliyun.com